

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ С УСТРОЙСТВОМ ГЛУБОКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

В. В. КРОТЕНОК, А. Н. БОХАН

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Глубокое ограничение следует применять при защите электрооборудования с пониженным уровнем электрической прочности изоляции. Как правило, это сети, содержащие вращающиеся машины. Применение ограничителя перенапряжений нелинейного (далее – ОПН) с пониженным уровнем ограничения перенапряжений приводит к увеличению энергии, выделяющейся в варисторах. Энергоемкость применяемых к установке ОПН определяется емкостью сети на землю, величиной и длительностью разрядных токов через варисторы. При этом необходимая энергоемкость может быть достигнута применением ОПН с увеличенным диаметром варисторов или увеличением числа параллельных колонок варисторов (ОПН). В схемах с вращающимися машинами уровни допустимых кратностей внутренних перенапряжений не должны превышать 3,3–3,4 амплитуды фазного напряжения сети [1, с. 9], а для двигателей со сроком эксплуатации старше 5 лет – $1,8U_{\phi}$ [2]. Выполненные исследования показывают, что наибольшие кратности перенапряжений возникают в сетях с незаземленной нейтралью. При этом создаются условия для повышенного энерговыделения в ОПН. Для обеспечения надежной работы электроустановки необходимо обеспечить требуемые уровни ограничения перенапряжений, а с другой стороны, энергия, выделяющаяся в ОПН, не должна превышать допустимую для них энергоемкость. При наличии дугогасящего реактора или заземления нейтрали через высокоомный резистор энергетические воздействия на ОПН снижаются. Однако в ряде случаев в системе электроснабжения нет возможности изменить режим нейтрали сети.

При разработке новых эффективных средств снижения перенапряжений необходимо решать следующие задачи: уменьшить уровни остающегося напряжения ОПН; снизить тепловыделения в ОПН в длительных установившихся режимах и обеспечить возможности длительной работы сети при замыкании на землю.

Разработано устройство с пониженным уровнем длительно допустимого рабочего напряжения ОПН. В устройстве последовательно ОПН подключен симистор, а параллельно им – делитель напряжения, состоящий из высокоомных сопротивлений. Сопротивления высокоомных резисторов делителя напряжения выбраны так, что напряжение на симисторе в нормальном режиме ниже порога его срабатывания. При металлическом замыкании на землю и отсутствии переходного процесса мгновенное значение напряжения на устройстве глубокого ограничения перенапряжений не превышает исходный защитный уровень и ток в цепи ОПН и тепловыделение практически отсутствуют. Это позволяет обеспечить возможность длительной работы электрической сети при замыканиях на землю и тем самым повысить надежность электроснабжения.

На рис. 1 представлена функциональная схема предлагаемого устройства глубокого ограничения перенапряжений в электросети с изолированной или компенсированной нейтралью.

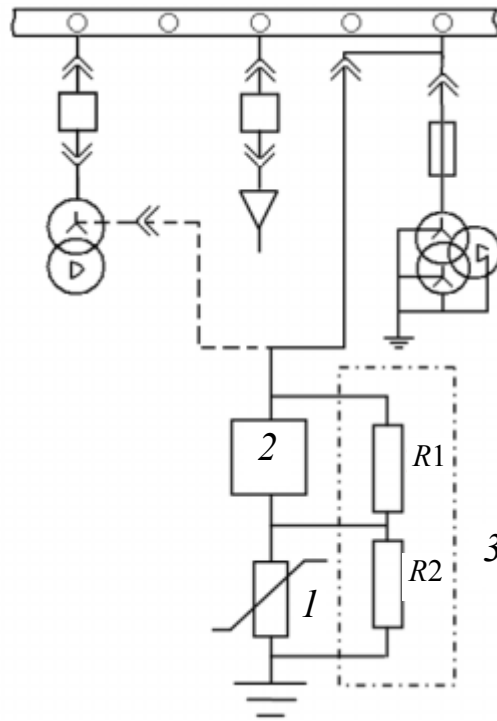


Рис. 1. Функциональная схема устройства глубокого ограничения перенапряжений и возможные схемы его подключения

На рис. 1 показаны ОПН 1 с пониженным уровнем ограничения перенапряжений, симистор 2 и делитель напряжения 3.

Устройство работает следующим образом. В нормальном режиме в цепи симистора и последовательно соединенного с ним ОПН ток отсутствует, так как симистор закрыт и напряжение, приложенное к нему, меньше напряжения включения при отсутствии управляющего тока. Делитель напряжения распределяет поданное на симистор напряжение, уровень которого ниже порога его срабатывания. При замыкании на землю в электрической сети вследствие переходного процесса на неповрежденных фазах возникают перенапряжения. В начальный момент переходного процесса, когда волна перенапряжения превышает исходный защитный уровень устройства, происходит открытие симистора. Падение напряжения на нем становится близким к нулю, а снижение исходного защитного уровня ограничителя перенапряжений приводит к его срабатыванию. Это значит, что все напряжение прикладывается к ОПН с пониженным уровнем ограничения. Пониженный уровень ограничения перенапряжений сохраняется до тех пор, пока мгновенное значение тока в цепи ОПН не перейдет через ноль и симистор автоматически закроется. Последующее включение симистора произойдет только тогда, когда уровень перенапряжений вследствие переходного процесса превысит установленное значение. При установившемся замыкании на землю, что характерно для металлического замыкания, напряжение на неповрежденных фазах увеличивается до линейного значения, а перенапряжение, связанное с переходным процессом, отсутствует. В этих условиях симистор находится в закрытом состоянии и ток через ОПН не протекает. Такой режим не может привести к повреждению ОПН, и работа в этом режиме может продолжаться неограниченно долго.

На рис. 2 представлены вольт-амперные характеристики ОПН 3/3,8 УХЛ1 и симистора ТС 152-160, а на рис. 3 – эквивалентная характеристика при последовательном их соединении.

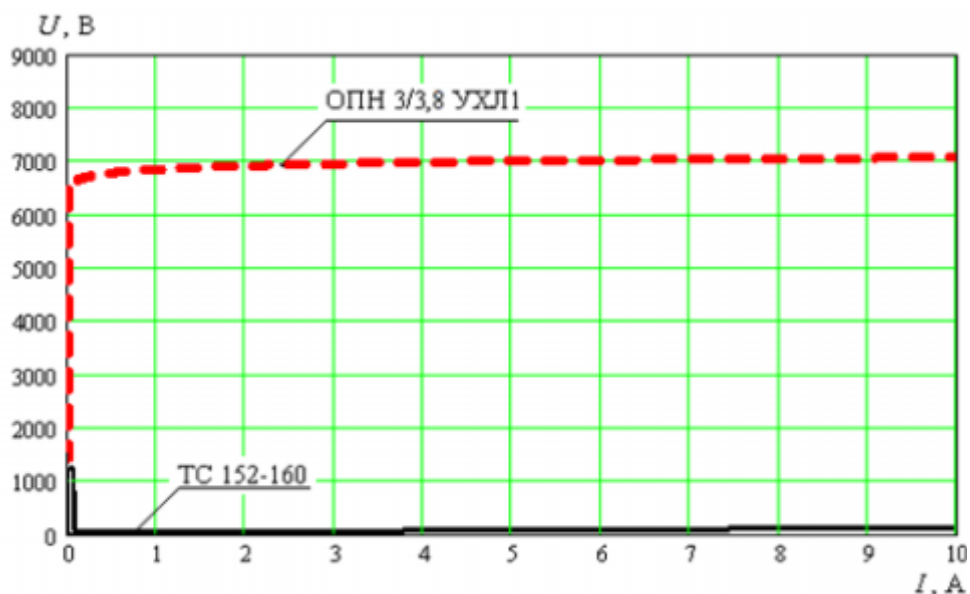


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики ОПН 3/3,8 УХЛ1 и симистора ТС 152-160

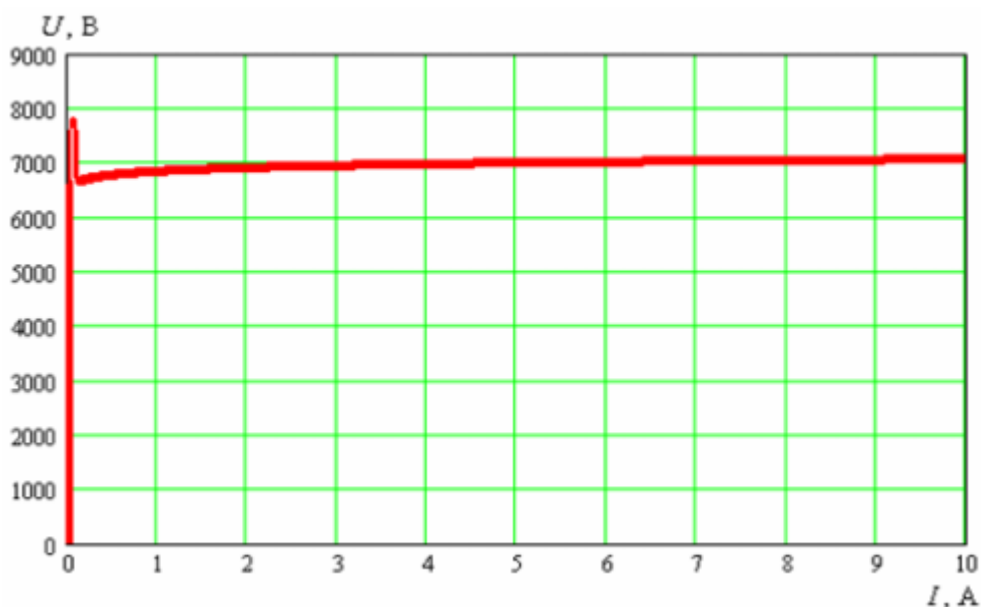


Рис. 3. Эквивалентная вольт-амперная характеристика при последовательном соединении ОПН 3/3,8 УХЛ1 и симистора ТС 152-160

Устройство глубокого ограничения перенапряжений в электросети, по сравнению с известными [3], обладает более низким уровнем остающегося напряжения и отсутствием тепловыделения в установившихся режимах. Соответственно оно позволяет снизить уровни перенапряжений в распределительных сетях с изолированной и компенсированной нейтралью, обеспечить возможность длительной работы сети при замыканиях на землю и тем самым повысить надежность электроснабжения. Данное устройство запатентовано в Республике Беларусь [4].

В настоящее время разработан ОПН производства ЗАО «Полимер-Аппарат» на класс напряжения 6–10 кВ, который снабжен отделителем [6]. Назначение отделителя – отключение ограничителя от сети при повреждении ОПН. Такой ограничитель можно использовать при установке ОПН в нейтраль с пониженным уровнем ограничения.

Проведен расчет переходных процессов в распределительной сети 6 кВ с установленным устройством глубокого ограничения перенапряжений на шины. В устройстве выбран симистор ТС 152/160, напряжение пробоя которого равно 1200 В.

Величина сопротивлений делителя напряжения выбрана так, что срабатывание устройства происходит при напряжении 9700 В. Сопротивления $R_1 = 1,240$ МОм; $R_2 = 8,760$ МОм. При достижении напряжения на устройстве величины 9700 В на симисторе напряжение достигнет 1200 В (напряжение срабатывания), и все напряжение будет приложено к ОПН. Напряжение 9700 В выбрано из условия, что срабатывание устройства не должно происходить при устойчивом замыкании на землю. При устойчивом замыкании на землю напряжение неповрежденных фаз составляет $\sqrt{3} U_{\phi \text{ макс}} = 9333$ В, что не приводит к срабатыванию устройства. ОПН выбран из условий его глубокого ограничения перенапряжений, так как в данном случае для сети 6 кВ длительно допустимое напряжение для ОПН КС 3/5 УХЛ1 составляет 5 кВ. Такой подход к выбору ОПН дает достаточно глубокое ограничение возникающих перенапряжений, значения которых не превышают $2,35U_{\phi}$. На рис. 4 приведены расчетные осциллограммы напряжений и тока устройства при повторяющихся дуговых однофазных замыканиях на землю с последующим переходом в устойчивое металлическое замыкание.

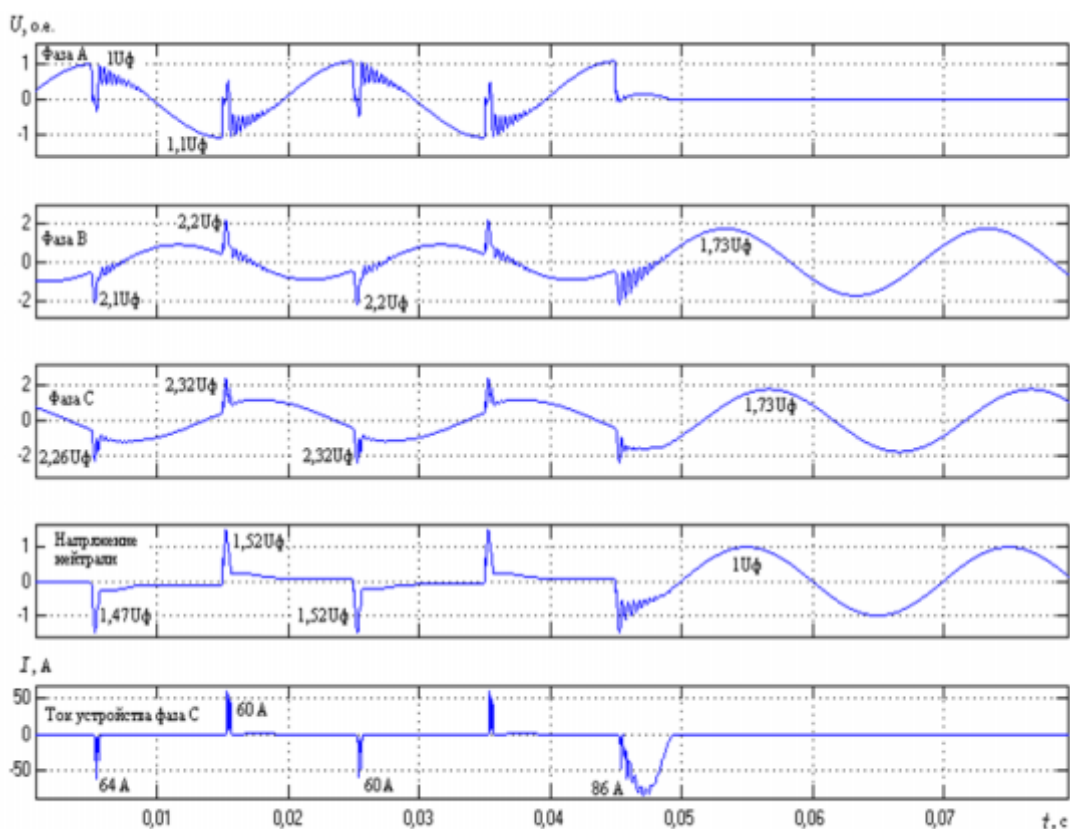


Рис. 4. Расчетные осциллограммы при однофазных замыканиях на землю фазы А при максимальном фазном напряжении и гашении дуги в полпериода собственных колебаний с последующим зажиганием в полпериода промышленной частоты и в конечном счете переходящим в устойчивое замыкание. На шинах установлен комплект устройства глубокого ограничения перенапряжения. Сеть 6 кВ с емкостным током замыкания 2,33 А

Выделяемую энергию в ОПН можно определить из расчетных осциллограмм по выражению

$$W_{\text{ОПН}} = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m U_{\text{ост } j} \cdot i_{\text{ОПН } j} \cdot \Delta t_j, \quad (1)$$

где $U_{\text{ост}}$, $i_{\text{ОПН}}$ – остающееся напряжение, В, и мгновенное значение тока, А, в ОПН при воздействии импульса перенапряжения; Δt_j – шаг интегрирования, с; $W_{\text{ОПН}}$ – энергия, выделяемая в ОПН, Дж; n – количество замыканий, шт.

Решая систему дифференциальных уравнений [5, с. 15], можно определить: выделяемую энергию в ОПН, количество рассеиваемой энергии в окружающую среду и температуру ОПН. За один импульс тока в ОПН КС 3/5 УХЛ1 пониженного уровня ограничения выделяется 75 Дж, температура варистора относительно температуры окружающей среды (20 °С) повысилась на 1 °С. Для случая, приведенного на рис. 4, энергия, выделяемая в ОПН, установленного на шинах, составляет 400 Дж. Критической температурой ОПН является 100 °С, она соответствует началу деструкции полимерных материалов при их нагреве [5, с. 11]. Если ОПН, установленный на шинах, выбран в соответствии с действующими рекомендациями, то энергия единичного импульса тока, протекающего через ОПН, в сетях 6–10 кВ обычно не превосходит 70 Дж [5]. При максимально возможной интенсивности дуговых замыканий (100 Гц) ОПН в устройстве глубокого ограничения перенапряжений может нагреться до критической температуры за 1 секунду. Применение данного устройства на шинах РУ требует анализа и оценки возможной допустимости длительной работы при перемежающихся замыканиях на землю.

Устройство глубокого ограничения перенапряжений можно применить установкой его в нейтраль (рис. 5). Например, для сети 6 кВ в составе устройства выбираем ОПН КС 3/3,8 УХЛ1, $R_1 = 2,190$ МОм, $R_2 = 7,81$ МОм и симистор ТС 152/160. Величина сопротивлений делителя напряжения выбрана так, что срабатывание устройства происходит при напряжении 5500 В. При достижении напряжения на устройстве величины 5500 В на симисторе напряжение достигнет 1200 В (напряжение срабатывания), и все напряжение будет приложено к ОПН. Напряжение 5500 В выбрано из условия, что срабатывание устройства не должно происходить при устойчивом замыкании на землю. При устойчивом замыкании на землю напряжение в нейтрали составляет $U_{\text{ф макс}} = 5389$ В, что не приводит к срабатыванию устройства. Перенапряжения в неповрежденных фазах составили $2,75U_{\text{ф}}$, в нейтрали $2U_{\text{ф}}$, ток устройства 50 А в импульсе. Причем с переходом перемежающейся дуги в режим установившегося замыкания на землю ток в устройстве ограничения, установленного в нейтраль, отсутствует. На неповрежденных фазах устанавливаются напряжения, равные $\sqrt{3} U_{\text{ф}}$, в нейтрали $U_{\text{ф}}$, что обеспечивает длительную работу устройства в таком режиме. При отсутствии переходного процесса устройство глубокого ограничения не вступает в режим ограничения и сеть работает практически в режиме изолированной нейтрали. На рис. 6 приведены результаты расчетов эскалации температуры, выделяемой энергии и рассеиваемой энергии в окружающую среду ОПН КС 3/3,8 УХЛ1 при возникновении перемежающейся дуги интенсивностью 100 Гц. Увеличить время работы устройства можно, подключив параллельно два или более ОПН одинакового класса и с одинаковым длительно допустимым напряжением. Так, для двух параллельно включенных ОПН КС 3/3,8 УХЛ1 (установленных в комплекте с устройством в нейтрали сети) расчетное время работы при интенсивности перемежающейся дуги 100 замыканий в секунду составило 3,2 секунды для трех, четырех и пяти параллельно работающих ОПН, расчетное время составило 4,5; 6,4; 8 секунд (рис. 7).

$U, \text{о. е.}$

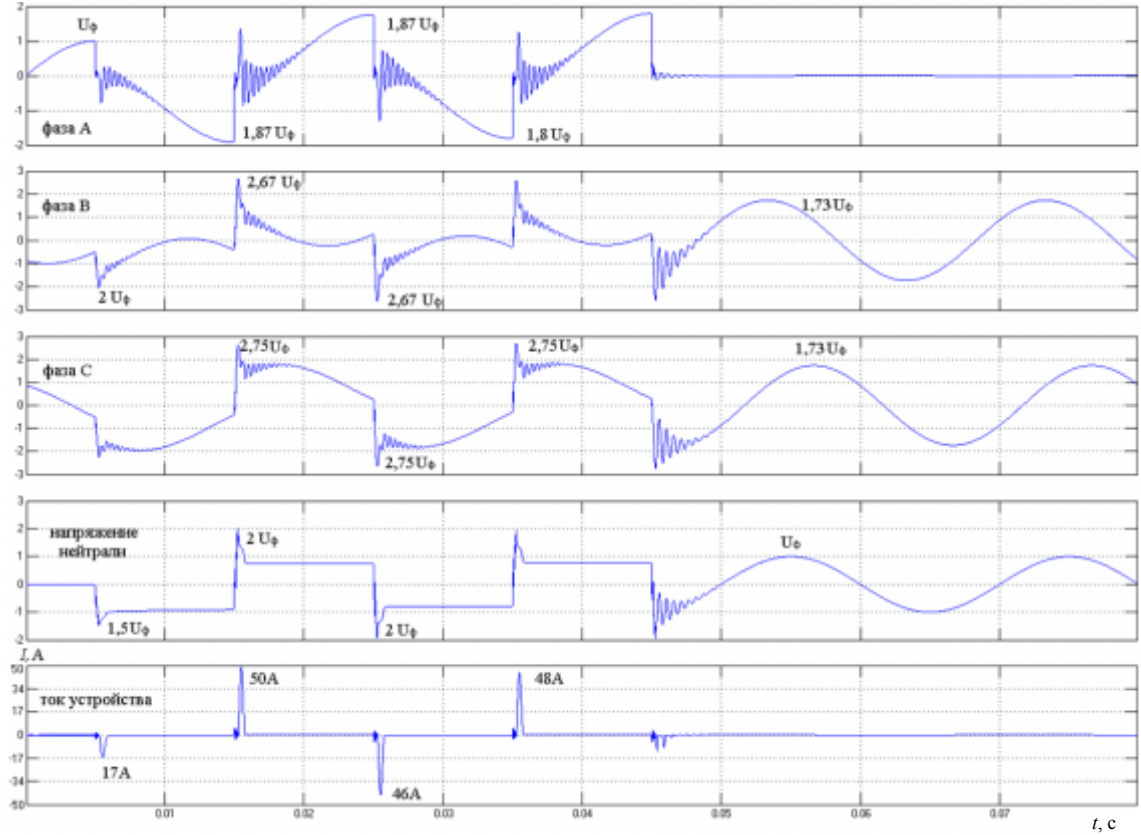


Рис. 5. Расчетные осциллограммы многократных однофазных замыканий на землю фазы А с переходом в устойчивое замыкание. В нейтрали установлено устройство глубокого ограничения перенапряжения с ОПН КС 3/3,8 УХЛ1. Сеть 6 кВ с емкостным током замыкания 2,33 А

$W_{\text{рас}}, \text{Дж}$

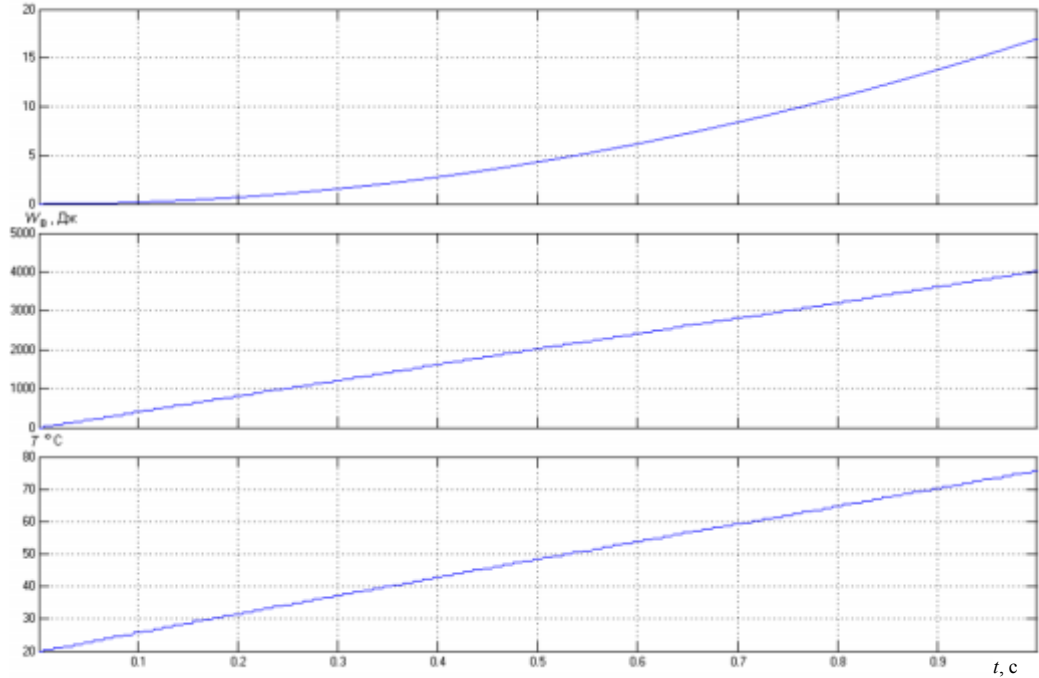


Рис. 6. Расчетные осциллограммы температуры (T) ОПН КС 3/3,8 УХЛ1, выделяемой энергии в ОПН ($W_{\text{в}}$), рассеиваемой энергии ОПН в окружающую среду ($W_{\text{рас}}$)

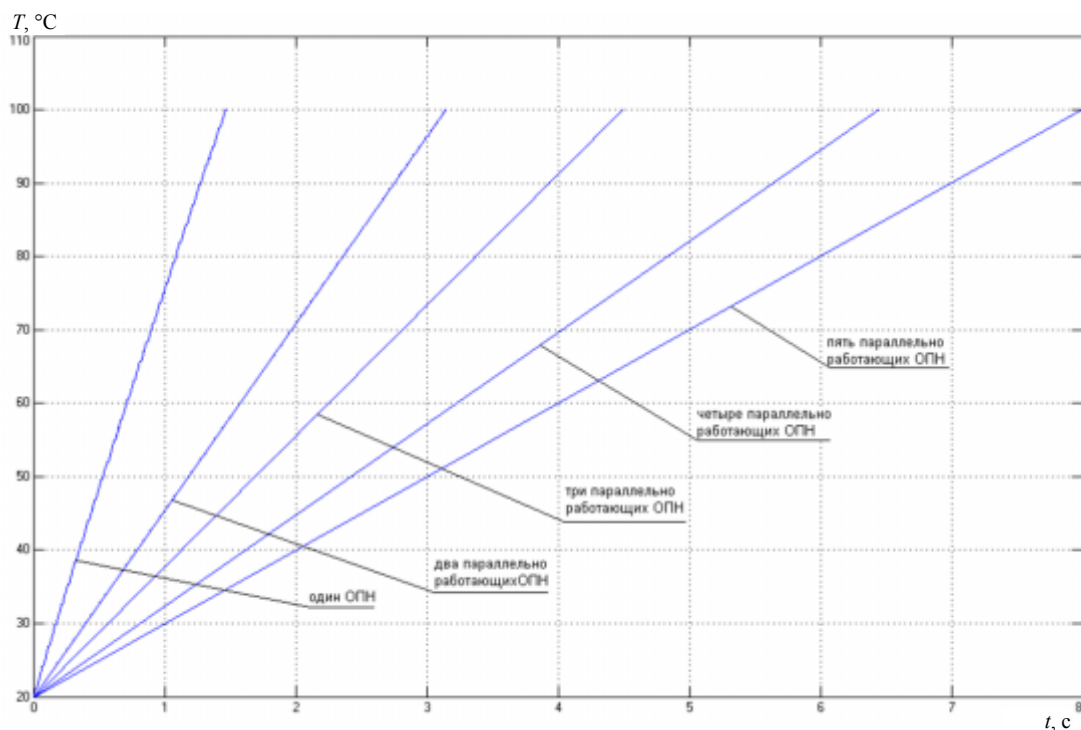


Рис. 7. Зависимости времени достижения температурой (T) ОПС КС 3/3,8 УХЛ1 критического уровня 100 °C при параллельном подключении 2, 3, 4, 5 ОПС

На практике дуговые замыкания на землю могут происходить намного реже, чем 100 раз в секунду. Осуществляя контроль интенсивности замыканий на землю, можно определять допустимую длительность существования замыкания на землю, по истечении которой необходимо отключить поврежденный элемент. Выполненные расчеты показывают, что при единичном импульсе (рис. 5) амплитудой 50 А в ОПС КС 3/3,8 УХЛ1 выделяется энергия 31 Дж. По результатам численного моделирования тепловых процессов в ОПС при замыканиях на землю, в сети определены допустимые длительности работы ОПС в зависимости от интенсивности дуговых замыканий. Проведен расчет (рис. 8) зависимости времени достижения температурой ОПС КС 3/3,8 УХЛ1 критического уровня 100 °C от интенсивности дуговых замыканий. Приведенные численные результаты получены для конкретного типа ОПС класса *TEL*, выполненного в полимерной изоляции на варисторах диаметром 40 мм.

По результатам численного моделирования полученных зависимостей (рис. 8), можно определить предельно допустимую длительность работы ОПС в зависимости от числа параллельно включенных ОПС и интенсивности дуговых замыканий на землю.

Энергия одного импульса в 31 Дж (рис. 5) рассеется в окружающую среду естественной конвекцией за 120 секунд. При интенсивности импульсов, равной один раз в две мин (30 раз в ч), температура ОПС никогда не достигнет критической.

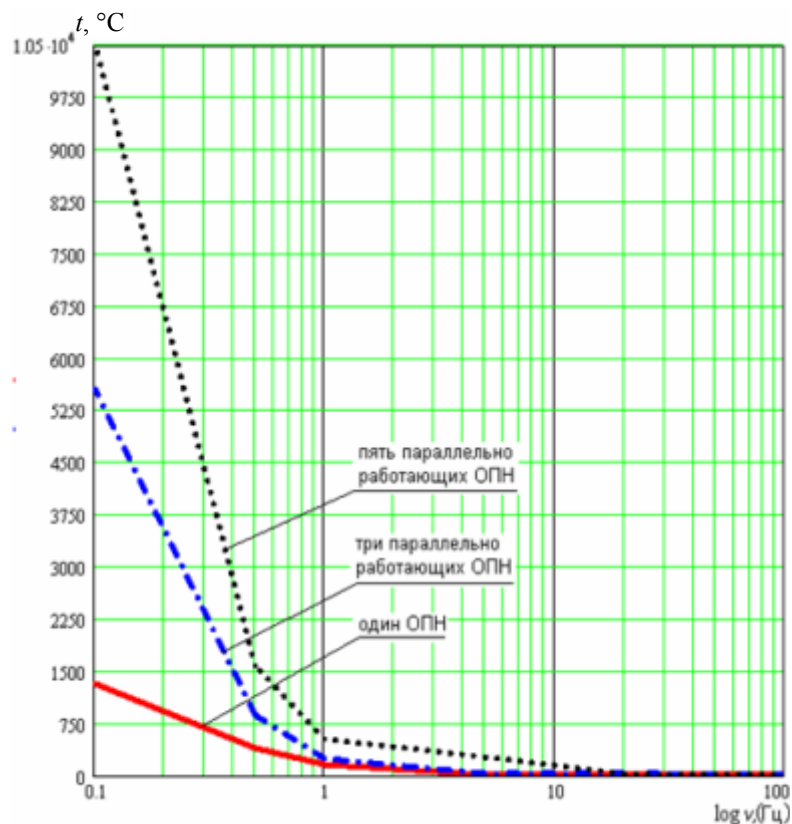


Рис. 8. Зависимости времени достижения температурой ОПН КС 3/3,8 УХЛ1 критического уровня $100 ^\circ\text{C}$ от интенсивности дуговых замыканий

Заключение

1. Применение устройства глубокого ограничения перенапряжений дает ряд преимуществ:

- обеспечивает глубокое ограничение возникающих перенапряжений;
- установка устройства глубокого ограничения перенапряжений в нейтрали позволяет уменьшить разрядные токи и тепловыделение в ОПН, подключенных на шинах РУ;
- снижение уровня ограничения перенапряжений приводит к быстрому затуханию высокочастотного процесса, обусловленного разрядом емкостей фаз на землю, и уменьшает вероятность повторных зажиганий дуги;
- при установившихся режимах однофазных замыканий мгновенное значение напряжения на устройстве не превышает исходный защитный уровень и ток в цепи ОПН и тепловыделение практически отсутствует, что позволяет обеспечить возможность длительной работы электрической сети при устойчивых замыканиях на землю.

2. Разработанное устройство глубокого ограничения перенапряжений в электросети позволяет эффективно снижать уровни перенапряжений в распределительных сетях с изолированной или компенсированной нейтралью на 20–30 %.

3. Исследованы тепловые режимы ОПН, входящего в состав устройства глубокого ограничения перенапряжений. Полученные зависимости позволяют определить допустимую длительность работы ОПН при дуговых замыканиях на землю.

4. В установившихся режимах устройство глубокого ограничения перенапряжений может обеспечивать возможность длительной работы сети при замыканиях на землю и тем самым повысить надежность электроснабжения. Устройство глубокого ограничения перенапряжений, выполненное по предложенной конструктивной схеме и рассчитанное на U_ϕ , может устанавливаться в нейтрали сети.

Литература

1. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений: РД 153-34.3-35.125–99 : утв. Первый зам. пред. Правления РАО «ЕЭС России». – М., 1999. – 26 с.
2. Алексеев, В. В. Электромагнитная совместимость высоковольтных электроприводов с коммутационными аппаратами / В. В. Алексеев, Э. А. Загривный // Материалы V Междунар. (XVI всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу АЭП–2007. – СПб., 2007. – С. 486–487.
3. Устройство глубокого ограничения перенапряжений : пат. № 2040841 Рос. Федерации, кл. H 02H 9/04 ; опубл. 27.07.95 // Бюл. № 21.
4. Устройство глубокого ограничения перенапряжений в электросети : пат. 8922 Респ. Беларусь, BY C1 H02H 9/0,4 9/00 / А. Н. Бохан, В. В. Кротенок, В. С. Овсянников ; заявитель ГГТУ им. П. О. Сухого. – № а 20040207 ; заявл. 15.03.2004; опубл. 28.02.07 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 2. – С. 184.
5. Титков, В. В. Особенности теплового режима нелинейных ограничителей перенапряжений в условиях длительной перемежающейся дуги заземления / В. В. Титков, В. Н. Авагердиев, В. Н. Эйвазов // Электро. – 2004. – № 6. – С. 23–28.
6. Демьяненко, К. Б. К вопросу о необходимости диагностики ОПН в процессе эксплуатации / К. Б. Демьяненко // Электро. – 2008. – № 3. – С. 43–47.

Получено 30.11.2010 г.